

令和元年6月13日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04090

研究課題名(和文) レーザー駆動フェムト秒ガンマ線パルスを用いた中性子発生

研究課題名(英文) Neutron generation using a laser-driven femtosecond gamma-ray pulse

研究代表者

三浦 永祐 (MIURA, Eisuke)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・上級主任研究員

研究者番号：10358070

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,600,000円

研究成果の概要(和文)：レーザー加速電子線により発生するガンマ線を用いた超短パルス中性子源の実現を目指した研究開発を行った。高エネルギー、高電荷量のレーザー加速電子線を発生するために、フェムト秒レーザー装置を高性能化した。粒子シミュレーションを用いて、高電荷量のレーザー加速電子線の発生条件を調べた。中赤外域のフェムト秒レーザーパルスを用いることによって、高電荷量の電子線を発生する効率の良いレーザー電子加速が可能であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

中性子線は物質の透過力が高く、また軽元素の識別能力が高いという特徴を持ち、材料の分析ツールとして有用である。しかし、中性子源の利用は原子炉や大型加速器施設に限られており、小型中性子源の実現が期待されている。本研究では、原理的には高速中性子が発生せず、放射線遮蔽や減速材が非常にコンパクトにできるレーザー駆動超短パルス低速中性子発生方法を提案し、その実現に向けた基盤技術を確認することができた。本研究成果をさらに発展させることにより実験室規模の小型中性子源が実現でき、将来的には材料分析等に利用されることが期待できる。

研究成果の概要(英文)：We carried out the research and development for realizing an ultrashort pulse neutron source using a gamma-ray source based on a laser-accelerated electron beam. To produce laser-accelerated electron beams with high energy and high charge, the high-power femtosecond laser system was upgraded. We investigated the conditions for the generation of laser-accelerated electron beam with high charge using particle-in-cell simulations. The simulation results showed the possibility of efficient laser electron acceleration for the generation of high-charge electron beams using a mid-infrared femtosecond laser pulse.

研究分野：プラズマ物理、レーザー工学、量子ビーム科学

キーワード：レーザー加速 レーザーコンプトン散乱 ガンマ線 中性子

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

中性子線は物質の透過力が高く、また軽元素の識別能力が高いという特徴を持ち、材料の分析ツールとして有用である。しかし、中性子源の利用は原子炉や大型加速器施設に限られており、中性子源を小型化すると共に、高度な分析・計測技術を構築し、学術研究のみならず産業応用をも目指した研究開発が進展している。小型加速器駆動の中性子源に加え、レーザー駆動による小型中性子源実現にも期待が寄せられている。これまで、レーザー核融合、レーザー駆動電子線の制動輻射ガンマ線、レーザー駆動陽子線を用い、エネルギーが数 MeV 程度の高速中性子発生は実証されてきたが、各種分析に有用な低速中性子をレーザー駆動により直接発生した報告はなかった。

パルス中性子線を利用した分析は、飛行時間法と呼ばれる検出器への中性子の到着時間を用いてエネルギーを弁別し行なわれることが多い。エネルギー分解能を決めるのは中性子線のパルス幅であり、超短パルスの中性子線を発生できれば、高いエネルギー分解能が得られ、高度な分析・計測技術の構築が可能になる。

2. 研究の目的

本研究では、レーザー駆動により原理的に高速中性子が発生せず、超短パルスの低速中性子線を直接発生する手法を提案し、それを実証することを目的とした。本手法では超短パルス低速中性子線を直接発生できるので、高いエネルギー分解能を用いた高度な分析・計測が可能になることに加え、放射線遮蔽や減速材が非常にコンパクトにできるので、装置全体を小型化することも可能である。

3. 研究の方法

本研究で提案するレーザー駆動中性子発生方法の原理図を図 1(a)に示す。超短パルスレーザーとプラズマの相互作用を利用した電子加速であるレーザー加速により数 100 MeV まで電子を加速し、その電子線とレーザーパルスを相互作用させ、レーザーコンプトン散乱 (laser Compton scattering : LCS) によってガンマ線を発生する。レーザー加速ではフェムト秒電子線パルスが得られるので、フェムト秒レーザーパルスと相互作用させることによりフェムト秒ガンマ線パルスが得られる。LCS では、図 1(b)の破線で示す様に、最高エネルギー近傍で急峻なピークを持つ準単色ガンマ線が得られる。図 1(b)の実線で示した ${}^9\text{Be}(\gamma, n)$ 光核反応断面積の閾値 (1.67 MeV) 近傍にガンマ線エネルギーをチューニングすると、ハッチした部分のエネルギー幅程度の中性子が発生する。図 1(c)のシミュレーション結果に示す様に、原理的に高速中性子の発生を抑制し、keV 領域の低速中性子のみを発生できる。フェムト秒ガンマ線パルスを用いるので、中性子線のパルス幅はターゲットの厚みで決まり、センチメートル程度のターゲットを用いれば、ピコ秒の超短パルス中性子線の発生が可能である。

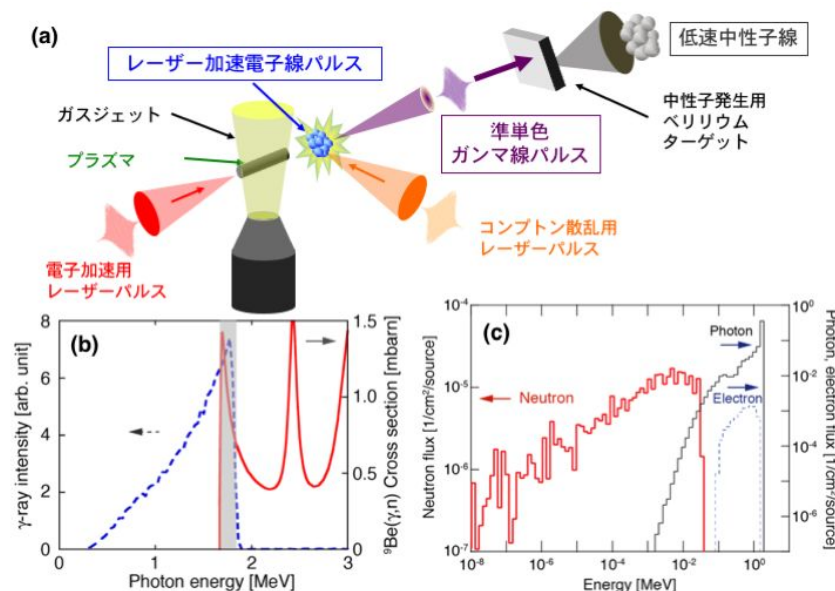


図 1(a) 本研究で提案するレーザー駆動中性子発生法の概念図。(b)ベリリウムの光核反応断面積 (実線) と LCS ガンマ線 (破線) スペクトル。(c)シミュレーションで計算された中性子スペクトル。

4. 研究成果

1 レーザー加速による高エネルギー電子線、ガンマ線発生のためのレーザー装置の高性能化
光子エネルギーが1.7 MeV近傍のLCSガンマ線を発生するには、レーザー加速により200 MeVの準単色電子線を発生し、その電子線と波長400 nmのレーザーパルスを相互作用させる必要が

ある。レーザー加速電子線を200 MeVまで高エネルギー化するため、実験に用いるチタンサファイアレーザー装置の高出力化に取り組んだ。実験に用いるレーザー装置では、フェムト秒レーザーパルスを一旦伸張し、高エネルギー化した後に圧縮する方式が採用されている。従来よりも溝本数の多い高反射率型の回折格子をパルス圧縮に用い、高出力化を図った。これにより、パルスの伸張と圧縮に用いる回折格子の溝本数が異なることになったので、プレパルスの少ない高品質なフェムト秒レーザーパルスを得るために、パルス伸張器も同時に改造した。これまでと同様に、50 fsまでのパルス圧縮を達成することができた。LCSで用いる波長400 nmのレーザーパルス発生のために、厚さが1 mm程度の極薄KDP (KH₂PO₄) 結晶を用い、800 nm光の2倍高調波発生を確認した。

パルス伸張器も含めた大幅なレーザー改造に時間を費やしたことで後段のレーザー装置にトラブルが発生し、レーザー電子加速実験の時間があまり取れず、レーザー加速電子線の高エネルギー化等は実証できなかった。しかし、その基盤となるレーザー装置の高性能化を実現することはできた。

2 長波長レーザーを用いた高効率レーザー電子加速の探索

本手法で中性子収量を増強するには、LCSガンマ線収量を増強する必要がある。LCSではガンマ線収量は電子線の電荷量に比例するので、レーザー加速電子線の電荷量を増強する必要がある。レーザー加速では、電子を加速するプラズマ波はレーザーの作り出す光圧に相当するポンデロモティブ力が外力となり励起される。このポンデロモティブ力は、レーザー波長の二乗に比例するので、長波長の励起レーザーを用いることによって、効率良くプラズマ波を励起し、高電荷量の高エネルギー電子線発生が可能がある。そこで、レーザーとプラズマの相互作用を模擬する粒子 (Particle-in-cell: PIC) シミュレーションを用いて、長波長レーザーを利用した高効率電子加速の可能性を検証した。

図2(a)は、波長1.5 μm、エネルギー100 mJ、パルス幅40 fsのレーザーパルスを規格化された強度 $a_0=2$ でガスジェットに集光照射した際、そのプラズマ中を伝搬するレーザーの規格化強度の空間発展を示す。この時生成されるプラズマの電子密度は $8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ である。図2(a)の $x=500 \mu\text{m}$ 近傍が真空とガスジェットの境界であり、この境界近傍に20 μm径に集光されたレーザーは、集光径を保ちながらプラズマ中を伝搬している。レーザーがプラズマ中を伝搬するに伴い電子は加速される。図2(b)は電子エネルギーの変化を示す。レーザーがプラズマ中を1 mm伝搬したところで加速電子は65 MeVの最高エネルギーに達し、エネルギーが揃った準単色電子線が発生する様子が示されている。

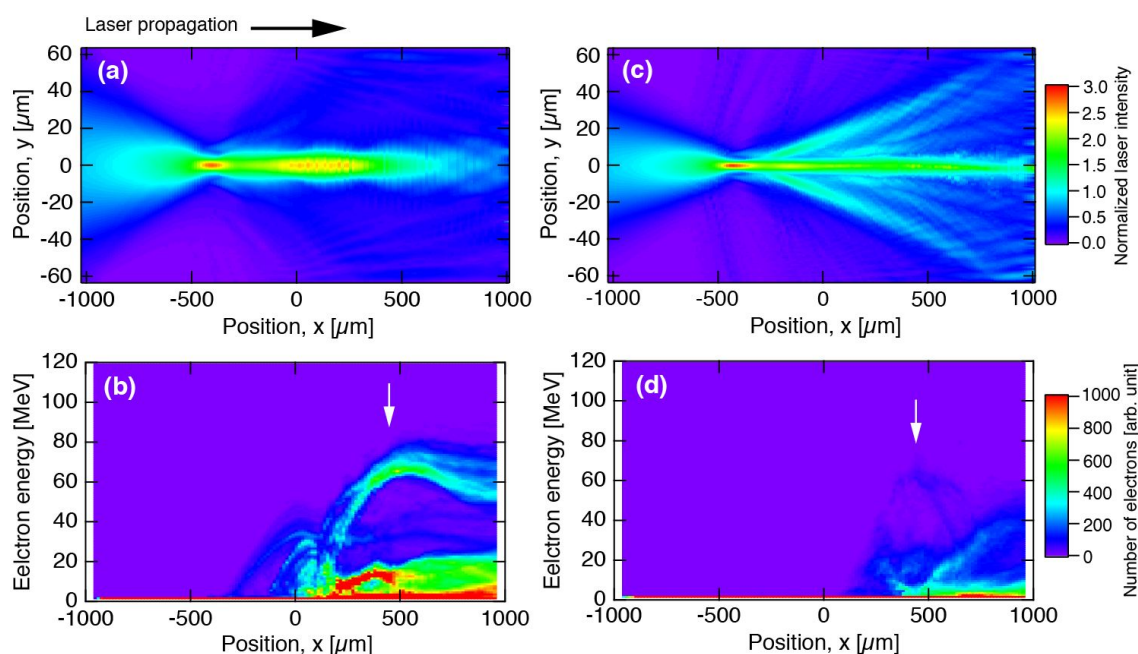


図2 レーザー加速の二次元PICシミュレーション結果。(a)(b)が1.5 μmレーザー、(c)(d)が0.8 μmレーザーの場合。上段(a)(c)がプラズマ中のレーザーの伝搬、下段(b)(d)が電子が加速される様子を示す。

従来、主に用いられてきたチタンサファイアレーザー (波長0.8 μm) による電子加速のシミュレーションも参照として行った。波長0.8 μm、エネルギー200 mJ、パルス幅40 fsのレーザーパルスを規格化強度 $a_0=2$ でガスジェットに集光照射し、そのプラズマ中を伝搬するレーザー強度の空間発展を図2(c)に、電子エネルギーの変化を図2(d)に示す。この時生成されるプラズマの電子密度は $1.6 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ である。0.8 μmレーザーの場合、15 μm径に集光されたレーザーの一部は集光径を保ちながら伝搬するが、横方向に広がる成分が多い。図2(d)に示した様

に、レーザーパルスが 1 mm 程度伝搬したところで、電子エネルギーは 60 MeV に達し準単色電子線が発生しているが、加速される電子数は少ない。図 3 は、電子エネルギーが最高に達する場所(図 2(b)(d)中の矢印位置)での電子エネルギースペクトルを示す。図 3 において、0.8 μm レーザーの場合のエネルギースペクトルを 10 倍して表示している。両条件においてエネルギーが 60 MeV 近傍の準単色電子線が得られているが、1.5 μm レーザーでは 0.8 μm レーザーの 10 倍近い電荷量が得られている。図 2(a)に示された様に、1.5 μm レーザーの場合、集光径を保持してプラズマ中を伝搬するので、高いレーザー強度が維持されており、大振幅のプラズマ波が発生する。一方、0.8 μm レーザーの場合、レーザーパルスが高い強度を維持できずに伝搬するため効率的にプラズマ波が励起されない。プラズマ中の電子がプラズマ波に捕捉され加速されるので、振幅の大きなプラズマ波が発生した場合は、加速される電子数が増大する。2 つのシミュレーション結果は、規格化強度が同じ条件で行なっている。規格化強度は波長に比例するので、同じ規格化強度を得る上で、長波長レーザーの場合は集光径を大きくできる。レーザーの集光径を大きくできれば、電子加速に寄与する断面を広くでき、加速電子数を増強することができる。1.5 μm レーザーで加速電子の電荷量の増強が図れたのは、大振幅のプラズマ波が励起されたこと、電子加速に寄与する断面を広くできたからと考えられる。

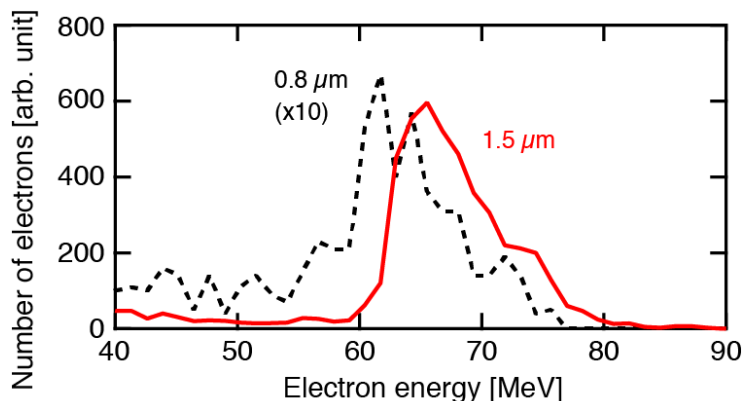


図 3 PIC シミュレーションで得られた加速電子のエネルギースペクトル。0.8 μm レーザー(破線)は 10 倍して表示。

図 2(c)(d)のシミュレーション結果は、レーザー加速としては比較的高い 70 pC 程度の電荷量を持つ電子線発生に成功したこれまでの産総研の実験[引用文献 1,2]を模擬したものである。これまでの実験結果、上記のシミュレーション結果に基づく、1.5 μm レーザーにより数 100 pC という既存の高周波加速器に匹敵する大電荷量電子線の発生が可能になる。さらに特筆すべきことは、シミュレーションのレーザーパワーが 0.8 μm では 5 TW に対し、1.5 μm では半分の 2.5 TW であることである。この様に、長波長レーザーの方が効率良いレーザー加速が可能であることが示された。既に、波長 1.5 μm のフェムト秒高出力レーザーは開発されており[引用文献 3,4]、このレーザーシステムを用いることにより、高電荷量を持つレーザー加速電子線発生が期待できる。

これまで、レーザー加速においては励起レーザー波長を加速効率化の指標として扱った先行研究はなかった。高電荷量の電子線をより少ないレーザーパワーで発生する高効率のレーザー電子加速には、長波長レーザーが有利であるという新たな知見を得ることができた。

<引用文献>

- E. Miura and S. Masuda, Stable generation of quasi-monoenergetic electron beams with laser-driven plasma-based acceleration by suppressing nanosecond prepulse, *Applied Physics Express*, 2, 2009, 126003-1/3.
- E. Miura, S. Ishii, K. Tanaka, R. Kuroda, and H. Toyokawa, X-ray pulse generation by laser Compton scattering using a high-charge, laser-accelerated, quasi-monoenergetic electron beam, *Applied Physics Express*, 7, 2014, 046701-1/4
- Y. Fu, E. J. Takahashi and K. Midorikawa, High-energy infrared femtosecond pulses generated by dual-chirped optical parametric amplification, *Optics Letters*, 40, 2015, 5082-5085.
- Y. Fu, K. Midorikawa and E. J. Takahashi, Towards a petawatt-class few-cycle infrared laser system via dual-chirped optical parametric amplification, *Scientific Reports*, 8, 2018, 7692-1/11.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 1 件)

- 三浦 永祐、レーザー航跡場加速電子線を用いた逆コンプトン散乱 X 線発生、レーザー研究、45、2017、87-93 (査読有)。

[学会発表](計5件)

三浦 永祐、レーザー加速による粒子線生成と応用、名古屋大学未来社会創造機構モビリティ領域第25回次世代自動車公開シンポジウム、2016.

三浦 永祐、益田 伸一、高橋 栄治 中赤外レーザーを用いた高効率レーザー電子加速の探索、第65回応用物理学春季学術講演会、2018.

Eisuke Miura, Shin-ichi Masuda, and Eiji J. Takahashi, Exploration of efficient laser-driven plasma acceleration using an intense mid-infrared laser pulse, International Conference on High Energy Density Sciences 2018 (HEDS2018), 2018.

Eiji J. Takahashi, Shin-ichi Masuda, and Eisuke Miura, Efficient laser wakefield acceleration by using mid-infrared pulses, Conference on Lasers and Electr-Optics 2018 (CLEO2018), 2018.

Eiji J. Takahashi, Shin-ichi Masuda, and Eisuke Miura, Evaluation of efficient laser plasma acceleration driven by a relativistic mid-infrared laser field, 31st Annual Conference of the IEEE Photonics Society (IPC 2018), 2018.

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：山崎 淳

ローマ字氏名：(YAMAZAKI, Atsushi)

所属研究機関名：名古屋大学

部局名：工学研究科

職名：助教

研究者番号(8桁)：10436537

研究分担者氏名：藤原 健

ローマ字氏名：(FUJIWARA, Takeshi)

所属研究機関名：国立研究開発法人産業技術総合研究所

部局名：計量標準総合センター

職名：研究員

研究者番号(8桁)：90552175

研究分担者氏名：豊川 弘之

ローマ字氏名：(TOYOKAWA, Hiroyuki)

所属研究機関名：国立研究開発法人産業技術総合研究所

部局名：計量標準総合センター

職名：研究グループ長

研究者番号(8桁)：80357582

研究分担者氏名：黒田 隆之助

ローマ字氏名：(KURODA, Ryunosuke)

所属研究機関名：国立研究開発法人産業技術総合研究所

部局名：材料・化学領域

職名：ラボチーム長

研究者番号(8桁)：70350428

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：高橋 栄治

ローマ字氏名：(TAKAHASHI, Eiji)

研究協力者氏名：益田 伸一

ローマ字氏名：(MASUDA, Shin-ichi)